Das Michelson-Morley-Experiment

Diese Datei enthält die beiden Originalarbeiten (1881, 1887) zum Michelson-Morley-Experiment in deutscher Übersetzung.*

Inhaltsverzeichnis

Eine alternative, ältere Übersetzung (allerdings nur der 1881-Arbeit) wurde 1931 veröffentlicht als: *Die Relativbewegung der Erde gegen den Lichtäther. In: Die Naturwissenschaften. 19, Nr. 38, von Clara von Simson.*

Die relative Bewegung der Erde und des Lichtäthers (1881)

von Albert A. Michelson. Master, U. S. Navy.

Original: The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether, American Journal of Science, 1881, 22: 120-129, http://en.wikisource.org/wiki/The_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Luminiferous_Ether

Die Undulationstheorie des Lichtes nimmt die Existenz eines als Äther bezeichneten Mediums an, dessen Vibrationen die Phänomene von Wärme und Licht erzeugen, und welches angenommenerweise den ganzen Raum erfüllt. Nach Fresnel nimmt der in optischen Medien eingeschlossene Äther an der Bewegung dieser Medien teil, und zwar in einem von Brechungsindex abhängigen Ausmaß. Für Luft würde diese Bewegung lediglich einen kleinen Teil der Bewegung der Luft selbst ausmachen und kann vernachlässigt werden.

Angenommen, dass der Äther ruhend ist und die Erde sich durch ihn bewegt, dann würde die Zeit die das Licht benötigt um von einem Punkt zu einem anderen auf der Erdoberfläche zu gelangen, abhängig sein von der Richtung in der es sich bewegt.

Es sei

V = die Lichtgeschwindigkeit.

D = der Abstand zwischen den beiden Punkten.

d = die Strecke zwischen welchen sich die Erde bewegt, während das Licht sich von einem Punkt zum anderen bewegt.

d_1 = die Strecke welche die Erde zurücklegt, während das Licht sich in entgegengesetzter Richtung bewegt.

Angenommen dass die Richtung der Verbindungslinie zwischen den beiden Punkten übereinstimmt mit der Richtung der Erdbewegung, und T ist die Zeit die das Licht benötigt um von einem Punkt zum anderen zu gelangen, und T_1 ist die Zeit die es benötigt um in die entgegengesetzte Richtung zu gelangen. Weiter sei T_0 die benötigte Zeit um den Weg zurückzulegen wenn die Erde in Ruhe ist. Dann

$$T = \frac{D+d}{V} = \frac{d}{v}; \text{ und } T_1 = \frac{D-d}{V} = \frac{d_1}{v}.$$

Aus diese Beziehungen finden wir $d = D\frac{v}{V-v}$ und $d_1 = D\frac{v}{V+v}$, woraus $T = \frac{D}{V-v}$ und $T_1 = \frac{D}{V+v}$ folgt; annähernd $T - T_1 = 2T_0\frac{v}{V}$ und $v = V\frac{T-T_1}{2T_0}$.

Wenn es nun möglich wäre $T - T_1$ zu messen, da V und T_0 bekannt sind, dann könnten wir die Geschwindigkeit v der Erdbewegung durch den Äther finden.

In einem in "Nature" veröffentlichten Brief kurz nach seinem Tod, zeigte Clerk Maxwell, dass $T - T_1$ berechnet werden könnte durch Messung der Lichtgeschwindigkeit mittels der Verfinsterungen von Jupiters Satelliten, in Perioden wenn dieser Planet in verschiedenen Richtungen bezüglich der Erde liegt; doch zu diesem Zweck müssen die Beobachtungen der Verfinsterung die Genauigkeit der bisher durchgeführten weit übertreffen. Im selben Brief wurde auch

dargelegt, dass der Grund warum eine solche Messung nicht an der Erdoberfläche durchgeführt werden kann, darin liegt dass wir bislang keine Methode der Messung der Lichtgeschwindigkeit besitzen welche nicht die Notwendigkeit beinhaltet, das Licht entlang seines Weges zurückzusenden, wodurch es annähernd so viel verliert wie es gewonnen hatte.

Die vom Quadrat des Verhältnisses der beiden Geschwindigkeiten abhängige Differenz, ist nach Maxwell viel zu klein um messbar zu sein.

Das Folgende ist nun darauf gerichtet zu zeigen, dass – mit einer Wellenlänge von gelbem Licht als Standard – die Größe (wenn sie existiert) einfach zu messen ist.

Unter Benutzung der selben Notation wie zuvor haben wir $T = \frac{D}{V-v}$ und $T_1 = \frac{D}{V+v}$. Die ganze benötigte Zeit für den Hin- und Rückweg ist $T + T_1 = 2D\frac{V}{V^2-v^2}$. Wenn das Licht jedoch in rechtwinkliger Richtung zur Erdbewegung unterwegs wäre, dann würde es völlig unbeeinflusst sein und die Zeit für den Hin- und Rückweg würde deshalb $2\frac{D}{V} = 2T_0$ sein. Die Differenz zwischen den Zeiten $T + T_1$ und $2T_0$ ist

$$2DV\left(\frac{1}{V^2-v^2} - \frac{1}{V^2}\right) = \tau; \quad \tau = 2DV\frac{v^2}{V^2(V^2-v^2)}$$

oder annähernd $2T_0\frac{v^2}{V^2}$. In der Zeit τ würde das Licht die Distanz $V\tau = 2VT_0\frac{v^2}{V^2} = 2D\frac{v^2}{V^2}$ zurücklegen.

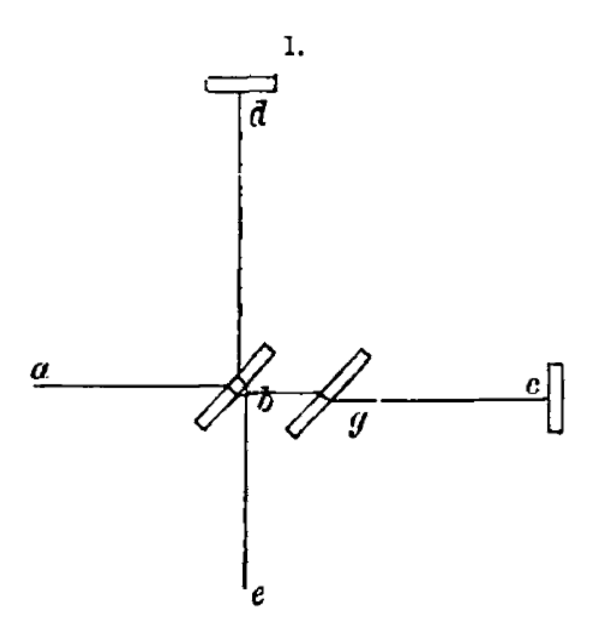
Das heißt, die tatsächlich zurückgelegte Distanz des Lichtes ist im ersten Fall größer als im zweiten, und zwar um die Größe $2D\frac{v^2}{V^2}$.

Wenn nur die Erdgeschwindigkeit in ihrem Orbit berücksichtigt wird, dann ist das Verhältnis annähernd $\frac{v}{V} = \frac{1}{10\ 000}$, und $\frac{v^2}{V^2} = \frac{1}{100\ 000\ 000}$ Millimeter, oder 2 000 000 in Wellen von gelbem Licht, also $2D\frac{v^2}{V^2} = \frac{4}{100}$ ausgedrückt in der selben Einheit.

Wenn deshalb ein Apparat so konstruiert ist, um es zwei Lichtbündel (die sich auf zueinander rechtwinkligen Pfaden bewegen) zu erlauben in Interferenz zu treten, dann würde das sich in Richtung der Erdbewegung ausbreitende Lichtbündel in Wirklichkeit $\frac{4}{100}$ einer Wellenlänge weiter kommen, als für den Fall wenn die Erde in Ruhe wäre. Das andere Lichtbündel im rechten Winkel würde durch diese Bewegung nicht beeinträchtigt werden.

Wenn nun der Apparat um 90° gedreht wird, so dass das zweite Lichtbündel in die Richtung der Erdbewegung gebracht wird, dann wird sein Pfad um $\frac{4}{100}$ Wellenlängen verlängert werden. Die Gesamtänderung der Position der Interferenzbänder würde $\frac{8}{100}$ der Distanz zwischen den Bändern betragen, eine leicht messbare Größe.

Die Bedingungen für die Erzeugung einer Interferenz zwischen den beiden Lichtbündel, welche Pfade durchquert haben die rechtwinklig zueinander sind, wurden auf die folgende einfache Weise verwirklicht.



Licht aus einer Lampe a, Fig. 1, durchquert die planparallele Glasplatte b, geht teilweise durch den Spiegel c, und teilweise wird es zum Spiegel d reflektiert. Die Spiegel c und d bestanden aus Planglas, und waren an der Vorderseite versilbert. Von diesen wurde das Licht zu b reflektiert, wo eines reflektiert und das andere gebrochen wurde, und die beiden fallen entlang be zusammen.

Die Strecke bc wurde gleich bd gemacht, und die Glasplatte g wurde in den Pfad von Strahl bc eingefügt, um die Dicke des Glases b auszugleichen welches vom Strahl bd durchquert wird; dann werden die beiden Strahlen die gleichen Wege zurückgelegt haben und sind in dem Zustand um zu interferieren.

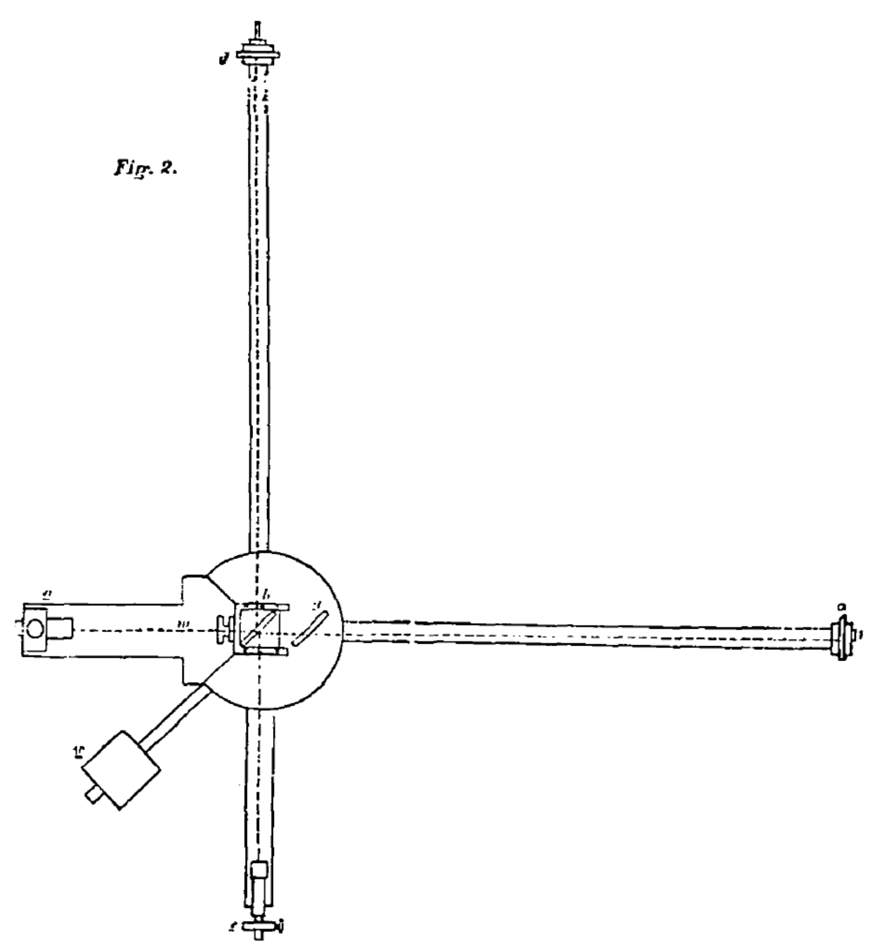
Der Grundriss des Instruments wird in Fig. 2 dargestellt, und perspektivisch in Fig. 3. Die selben Zeichen beziehen sich auf die selben Pfade in den beiden Figuren.

Die Lichtquelle, eine kleine Lampe ausgestattet mit einer Linse, wobei die Flamme im Fokus ist, wird bei a dargestellt, b und g sind die beiden Plangläser, wobei beide vom selben Teil abgeschnitten wurden; d und c sind die versilberten Glasspiegel; m ist die Mikrometerschraube welches die Platte b in Richtung be bewegt. Das Teleskop e zur Beobachtung der Interferenzbänder, ist ausgestattet mit einem Mikrometer-Okular, w ist ein Gegengewicht.

In den Experimenten wurden die Arme bd und bc durch lange Papierkästen umhüllt (die nicht in den Figuren dargestellt wurden) um sie gegen Temperaturänderungen zu schützen. Diese werden an den äußeren Enden durch die Stifte k und i gestützt, und an den anderen Enden durch die Kreisplatte o. Die Justierungen erfolgten folgendermaßen:

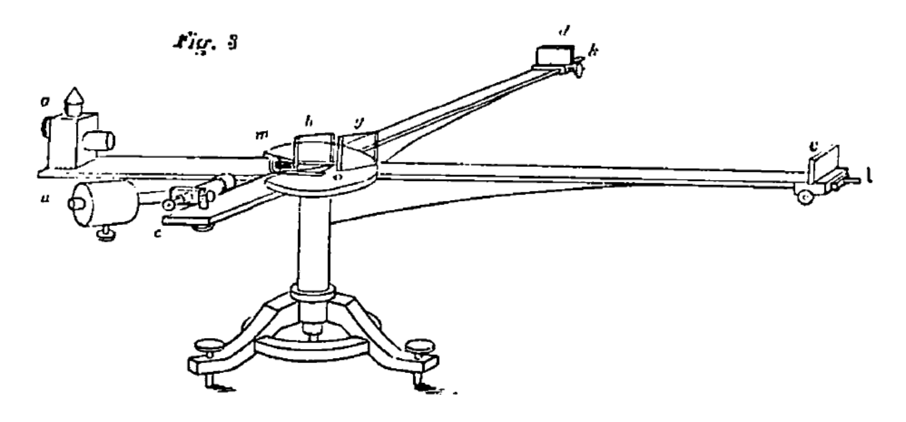
Die Spiegel c und d wurden so nah als möglich zur Platte b nach oben bewegt, und mittels der Schraube m wurde der Abstand zwischen einem Punkt auf der Fläche b und den beiden Spiegeln annähernd gleich gemacht unter Benutzung eines Zirkels. Die Lampe wurde angezündet, und ein schmales Loch das in

einen davor platzierten Schirm gemacht wurde, diente als Lichtpunkt; und die Platte b, welche auf zwei Ebenen justierbar war, wurde bewegt bis die beiden Bilder des Lichtpunktes (welche von den Spiegeln reflektiert wurden) ineinander fielen. Dann erzeugte die bei a platzierte Sodiumflamme augenblicklich die Interferenzbänder. Diese konnten dann bezüglich Breite, Position, oder Richtung durch eine kleine Bewegung der Platte b verändert werden, und wenn sie von passender Breite und maximaler Schärfe waren, wurde die Sodiumflamme entfernt und die Lampe wieder eingesetzt. Die Schraube m wurde dann langsam gedreht bis die Bänder wieder erschienen. Dann waren sie natürlich färbig, mit Ausnahme des Zentralbandes das annähernd schwarz war. Das Beobachtungsteleskop musste auf die Fläche von Spiegel d fokussiert werden, wo die Streifen am klarsten waren. Der ganze Apparat einschließlich der Lampe und des Teleskops, war um die vertikale Achse drehbar.



Es wird bemerkt werden, dass der Apparat sehr einfach zu einem “Interferential-Refraktor” gemacht werden kann, und er hat die beiden wichtigen Vorteile der geringen Kosten und der weiten Trennung der beiden Lichtbündel.

Der Apparat wie er oben beschrieben wurde, wurde von Schmidt und Haensch aus Berlin konstruiert. Es wurde auf einen Steinpfeiler im Physikalischen Institut, Berlin, platziert. Die erste Beobachtung zeigte jedoch, dass aufgrund der extremen Empfindlichkeit des Instruments für Vibrationen, die Arbeit nicht am Tage weitergeführt werden konnte. Als Nächstes wurde das Experiment nachts versucht. Wenn die Spiegel auf halber Länge der Arme platziert wurden, dann wurden die Streifen sichtbar, jedoch konnte ihre Position erst nach zwölf Uhr gemessen werden, und auch dann nur in Intervallen. Wenn die Spiegel zu den Enden der Arme hinaus bewegt wurden, waren die Streifen nur gelegentlich sichtbar.



Es erschien also, dass das Experiment nicht in Berlin ausgeführt werden konnte, und der Apparat wurde folglich zum Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam gebracht. Selbst hier reichte die gewöhnliche Steinplatte nicht aus, und der Apparat wurde wieder transferiert, diesmal in einen Keller, dessen Ringmauern die Grundlage bildeten für den Stützpfeiler des Äquator-Teleskops.

Hier waren die Streifen unter normalen Umständen ausreichend klar zu messen, doch das Instrument war so außerordentlich empfindlich, dass selbst das Stampfen auf dem Pflaster in 100 Meter Entfernung vom Observatorium, die Streifen vollständig zum Verschwinden brachte!

Wenn dies der Fall war bei einem mit Blick auf Vermeidung von Empfindlichkeit konstruierten Instrument, was müssen wir nicht alles erwarten von einem Instrument das so empfindlich wie möglich gemacht wurde!

Zu dieser Zeit des Jahres, anfang April, stimmt die Erdbewegung in ihrem Orbit ungefähr in Längsrichtung mit der geschätzten Richtung der Bewegung des Sonnensystems überein – nämlich in Richtung der Konstellation Herkules. Die Richtung dieser Bewegung ist geneigt in einem Winkel von ca. $+26^\circ$ zur Ebene des Äquators, und zu dieser Zeit des Jahres bildet die Tangente der Erdbewegung im Orbit einen Winkel von $-23\frac{1}{3}^\circ$ mit der Ebene des Äquators; folglich können wir sagen dass die Resultante innerhalb von 25° des Äquators liegt.

Je näher die beiden Komponenten einander sind bezüglich der Größe, desto näher stimmt die Resultante mit der Ebene des Äquators überein.

In diesem Fall, wenn der Apparat so platziert ist, dass die Arme abends nach Norden und Osten zeigen, dann würde der nach Osten zeigende Arm mit der resultierenden Bewegung übereinstimmen, und der andere würde rechtwinklig dazu sein. Deshalb, wenn zu dieser Zeit der Apparat um 90° gedreht wird, sollte die Verschiebung der Streifen zweimal $\frac{8}{100}$ sein oder 0.16 der Distanz zwischen den Streifen.

Wenn andererseits die Eigenbewegung der Sonne klein ist verglichen mit der Erdbewegung, dann sollte die Verschiebung $\frac{6}{10}$ von 0.08 oder 0.048 sein. Wenn der Mittelwert dieser beiden Zahlen als die höchst wahrscheinliche Zahl genommen wird, dann können wir sagen dass die gesuchte Verschiebung nicht weit entfernt ist von einem Zehntel der Distanz zwischen den Ringen.

Die grundlegende Schwierigkeit welche bei der Durchführung dieses Experimentes zu befürchten war, war diejenige welche von Temperaturänderungen der beiden Arme verursacht wurde. Wenn diese aus Messing bestehen, dessen Expansionskoeffizient 0.000019 ist und dessen Länge ca. 1000 mm oder 1 700 000 Wellenlängen beträgt, und wenn die Temperatur eines Armes nur um ein Hundertmillionstel eines Grades höher wäre als die des anderen, dann würden die Streifen dadurch eine Verschiebung erfahren die drei mal so groß ist als diejenige welche durch die Rotation verursacht wird. Andererseits, da die Temperaturänderung unabhängig von der Richtung des Armes ist, konnten die Auswirkungen dieser Änderungen eliminiert werden wenn sie nicht zu groß waren.

Es wurde jedoch gefunden, dass die Verschiebung aufgrund der Neigung der Arme während der Rotation so beträchtlich war, dass das Instrument zu seinem Hersteller retourniert werden musste, und zwar mit Anweisungen es so zu verfertigen dass es so einfach als möglich drehbar wird. Es wird aus den Tabellen ersichtlich werden, dass ungeachtet dieser Vorkehrung eine große Verschiebung beobachtet wurde in einer bestimmten Richtung. Dass diese vollständig durch die Stütze verursacht wurde, konnte durch ihre Drehung um 90° bewiesen werden, als sich die Richtung in welcher die Verschiebung erschien, auch um 90° veränderte.

Aufgrund der Empfindlichkeit Vibrationen gegenüber, konnte die Mikrometerschraube des Beobachtungsteleskops nicht benutzt werden, und eine auf Glas aufgetragene Skala wurde eingesetzt. Der Abstand zwischen den Streifen betrug drei Skalenabschnitte, und die Position des Zentrums der dunklen Streifen wurde auf zwei Viertel eines Abschnitts geschätzt, so dass die verschiedenen Schätzungen korrekt innerhalb von $\frac{1}{12}$ waren.

Es geschah regelmäßig, dass die Streifen aus irgendeinem kleinen Grund (unter anderem die Federung der dünnen Lampe aufgrund von Erwärmung) plötzlich ihre Position veränderten, in welchem Falle die Serie der Beobachtungen verworfen und eine neue Serie begonnen wurde.

Während der Justierung vor der dritten Serie der Beobachtungen, wurde die Richtung in der sich die Streifen bewegten, durch Bewegung der Glasplatte b umgekehrt, so dass die Verschiebung in der dritten und vierten Serie mit umgekehrten Vorzeichen unternommen werden musste.

Am Ende jeder Serie wurde die Stütze um 90° gedreht, und die Achse wurde sorgfältig in die Vertikale justiert mittels Fußschrauben und einer Wasserwaage.

	N.	N.O.	O.	S.O.	S.	S.W.	W.	N.W.	Anmerkungen
1. Umdrehung	0.0	0.0	0.0	-8.0	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	Serie 1, Fußschraube markiert als B, Richtung Osten.
2.	16.0	16.0	16.0	9.0	16.0	16.0	15.0	13.0	
3.	17.0	17.0	17.0	10.0	17.0	16.0	16.0	17.0	
4.	15.0	15.0	15.0	8.0	14.5	14.5	14.5	14.0	
5.	13.5	13.5	13.5	5.0	12.0	13.0	13.0	13.0	
	61.5	61.5	61.5		58.5	58.5	56.5	54.0	
S.	58.5.	W.	56.5	x	N.O.	61.5	S.E.	60.0	
	120.0					120.0			
	118.0		118.0			114.0		114.0	
Überschuss	+2.0					+6.0			

1. Umdrehung	10.0	11.0	12.0	13.0	13.0	0.0	14.0	15.0	Serie 2, B Richtung Süden.
2.	16.0	16.0	16.0	17.0	17.0	2.0	17.0	17.0	
3.	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	4.0	18.0	17.5	
4.	17.5	17.5	17.0	17.0	17.0	4.5	17.5	17.0	
5.	17.0	17.0	17.0	17.0	16.0	3.0	16.0	16.0	
	78.0	79.0	79.5	81.5	80.5	x	82.0	82.5	
S.	80.5	W.	82.0		N.O.	79.0	S.O.	81.5	
	158.5		161.5		160.0			164.0	
	161.5				164.0				
Überschuss	-3.0				-4.0				

1. Umdrehung	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	10.0	Serie 3, B Richtung Westen.
2.	18.0	17.5	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	26.0	
3.	11.0	11.0	13.0	12.0	13.0	13.5	13.5	21.0	
4.	1.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	14.0	
5.	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.5	5.5	16.0	
	37.0	35.5	39.0	38.5	39.5	40.5	71.0	x	
S.	39.5	W.	41.0		N.O.	35.5	S.O.	38.5	
	76.5		80.0			76.0		79.5	
			76.5					76.0	
Überschuss			+3.5					+3.5	

1. Umdrehung	14.0	21.0	15.5	17.0	14.0	14.5	14.5	16.0	Serie 4, B Richtung Norden.
2.	10.0	20.0	12.0	12.0	13.0	13.0	13.0	13.5	
3.	14.0	25.0	15.0	16.0	16.0	16.0	16.0	17.0	
4.	18.0	27.0	18.5	18.5	18.5	19.0	20.0	21.0	
5.	15.0	24.0	15.0	15.0	15.0	16.0	16.0	16.5	
	71.0	x.	76.0	78.5	76.5	78.5	79.5	84.0	
S.	76.5	W.	79.5		N.O.	73.5	S.E.	78.5	
	147.5		155.5			152.0		162.5	
			147.5					152.0	
Überschuss			+8.0					+10.5	

Der Titel der Spalten gibt die Richtung an, nach welcher das Teleskop gerichtet ist.

Die Summe der fehlerhaften Spalte ist mit x markiert, und in den Berechnungen ist der Durchschnitt der beiden neben liegenden Summen eingesetzt.

Die Zahlen in den Spalten sind die Positionen des Zentrums der dunklen Streifen in *Zwölftel* der Distanz zwischen den Streifen.

In den ersten beiden Serien, wenn die Summen der Spalten N. und S. die der Spalten E. und W. überschreiten, dann wird der Überschuss positiv genannt. Der Überschuss der Summen von N.O. und S.W. über diejenigen von N.W. und S.O. werden auch positiv genannt. In der dritten und vierten Serie wird dies umgekehrt.

Die als "Überschuss" markierte Zahlen sind die Summen von zehn Beobachtungen. Wenn wir deshalb durch 10 dividieren um den Durchschnitt zu erhalten, und ebenso durch 12 dividieren (denn die Zahlen sind die Zwölftel der Distanz zwischen den Streifen), finden wir

		N.S.		N.O., S.W.
Serie	1	+0.017		+0.050
"	2	-0.025		-0.033
"	3	+0.030		+0.030
"	4	+0.067		+0.087
		0.089		0.137
Mittel	=	+0.022		+0.034

Die Verschiebungen sind deswegen

Für die Spalten	N.S.	+0.022
""	N.O., S.W.	+0.034

Das Vorhergehende ist zu klein um als Verschiebung aufgrund eines einfachen Richtungswechsels betrachtet zu werden, und das Letztere sollte Null sein.

Die Zahlen sind einfach hervorstechende Experimentalfehler. Es kann tatsächlich aus den Summen der Spalten ersehen werden, dass die Zahlen mehr oder weniger regelmäßig von links nach rechts ansteigen (oder absteigen).

Diese graduelle Änderung welche die gesuchte Periodenänderung nicht im Mindesten beeinflussen sollte, würde für sich alleine einen hervorstechenden Fehler bedingen, einfach deswegen weil die Summe der beiden weiter links liegenden Spalten geringer (oder größer) sein müsste als die Summe der weiter rechts liegenden Spalten.

Diese Sicht wird besonders durch die Tatsache bestätigt, dass wo der Überschuss positiv für die Spalte N.S. ist, er auch positiv ist für N.O. und S.W., und wo er negativ ist, ist er auch dort negativ. Wenn wir deswegen diese graduelle Änderung ausschalten können, dann können wir einen viel kleineren Fehler erwarten. Das kann folgendermaßen am besten erreicht werden:

Wenn alle Summen der vier Serien zusammengezählt werden, und zwar die dritte und vierte mit einem negativen Vorzeichen, erhalten wir

N.	N.O.	O.	S.O.	S.	S.W.	W.	N.W.
31.5	31.5	26.0	24.5	23.0	20.8	18.0	11.0

oder wenn man durch 20×12 dividiert, um den Mittelwert im Sinne des Abstandes zwischen den Streifen zu erhalten,

N.	N.O.	O.	S.O.	S.	S.W.	W.	N.W.
0.131	0.131	0.108	20.102	0.096	0.086	0.075	0.046

Wenn x die Nummer der Spalte ist (gezählt von rechts), und y die entsprechende Summe, dann ergibt die Methode der kleinsten Quadrate die folgende Gleichung für die Gerade, die am nächsten an den Punkten x, y vorbeigeht –

$$y = 9.25x + 64.5$$

Wenn wir nun eine Kurve konstruieren mit Ordinaten, die gleich sind der Differenz der Werte von y (welche mit der Gleichung gefunden wurden), und dem tatsächlichen Wert von y, denn wird es die beobachteten Verschiebungen darstellen, und zwar frei vom fraglichen Fehler.

Diese Ordinaten sind:

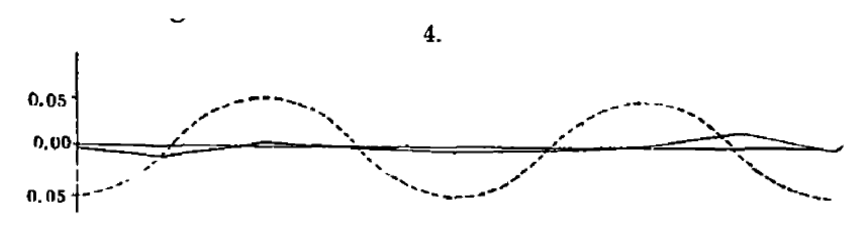
N.	N.O.	O.	S.O.	S.	S.W.	W.	N.W.
-.002	-.011	-.003	-.001	-.004	-.003	-.001	+.018

N.	N.O.	O.	S.O.	S.	S.W.	W.	N.W.
0.131	0.131	0.108	20.102	0.096	0.086	0.075	0.046

N.	-.002	E.	+.003	N.O.	-.011	N.W.	+.018
S.	-.004	W.	-.001	S.W.	-.003	S.O.	-.001
Mittel=	-.003		+.001	Mittel=	-.007		+.008
	+.001				+.008		
Überschuss=	-.004			Überschuss=	-.015		

Die kleinen Verschiebungen -0.004 und -0.015 sind einfach Experimentalfehler.

Die erhaltenen Resultate können jedoch höchst wirkungsvoll dargestellt werden, und zwar durch Konstruktion der tatsächlichen Kurve zusammen mit der Kurve, die hätte gefunden werden sollen wenn die Theorie korrekt gewesen wäre. Dies wird in Fig. 4. gezeigt



Die punktierte Kurve wurde unter der Annahme gezeichnet, dass die erwartete Verschiebung ein Zehntel des Abstandes zwischen den Streifen beträgt, jedoch wenn die Verschiebung nur $\frac{1}{100}$ wäre, dann würde die gebrochene Linie weiterhin näher mit der geraden Linie übereinstimmen als mit der Kurve.

Die Interpretation dieser Resultate ist, dass keine Verschiebung der Interferenzbänder existiert. Diese Konsequenz der Hypothese vom stationären Äther ist folglich als falsch erwiesen worden, und der notwendige Schluss folgt, dass die Hypothese fehlerhaft ist.

Dieser Schluss steht im direkten Widerspruch zur Erklärung des Aberrationsphänomens die bislang allgemein akzeptiert wurde, und welche voraussetzt dass die Erde sich durch den Äther bewegt, wobei letzterer unbewegt bleibt.

Es mag nicht fehl am Platze sein, einen Auszug aus einem Artikel hinzuzufügen, der 1846 von Stokes im Philosophical Magazine veröffentlicht wurde.

"All diese Resultate würden unmittelbar aus der Theorie der Aberration folgen, welche ich vorgeschlagen habe in der Juli-Nummer dieses Magazins: und es war mir auch nicht möglich irgendein experimentell vergleichbares Resultat zur erhalten, welches unterschiedlich wäre bezüglich der jeweils angenommenen Theorie. Dies bietet ein merkwürdiges Beispiel zweier völlig verschiedener Theorien, welche parallel nebeneinander laufen bezüglich der Erklärung der Aberration. Ich nehme nicht an dass viele bereit sind Fresnel's Theorie beizubehalten, wenn gezeigt wird dass man darauf verzichten kann, genauso wie wir ohne gute Gründe nicht bereit wären zu glauben, dass sich der Äther ganz frei durch die solide Masse der Erde bewegt. Trotzdem würde es befriedigend sein, wenn es möglich wäre die beiden Theorien einem entscheidenden Experiment zu unterziehen."

Am Schluss nehme ich die Gelegenheit wahr, um Mr. A. Graham Bell zu danken, der mir die Mittel zur Verfügung stellte um diese Arbeit durchzuführen, und Professor Vogel, dem Direktor des *Astrophysikalischen Observatoriums,* für seine Höflichkeit die Ressourcen seines Labors zu meiner Verfügung zu stellen.

Über die relative Bewegung der Erde und des Lichtäthers (1887)

Von Albert A. Michelson und Edward W. Morley.[1]

Original: On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether, American Journal of Science, November 1887, 34 (203): 333–345, http://en.wikisource.org/wiki/On_the_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Luminiferous_Ether

Der Entdeckung der Aberration des Lichtes folgte bald eine Erklärung auf Basis der Emissionstheorie. Der Effekt wurde auf eine einfache Zusammensetzung der Lichtgeschwindigkeit mit der Erdgeschwindigkeit zurückgeführt. Die Schwierigkeiten in dieser scheinbar ausreichenden Erklärung wurden übersehen, bis eine Erklärung auf Basis der Wellentheorie des Lichtes vorgeschlagen wurde. Diese neue Erklärung war vorerst genauso einfach wie die vorherige. Aber sie scheiterte bei der Erklärung der experimentell bewiesenen Tatsache, dass die Aberration unverändert blieb wenn Beobachtungen mit einem mit Wasser gefüllten Teleskop gemacht wurden. Denn wenn die Tangente des Aberrationswinkels das Verhältnis der Erdgeschwindigkeit und der Lichtgeschwindigkeit ist, dann – da letztere Geschwindigkeit im Wasser drei Viertel seiner Geschwindigkeit im Vakuum beträgt – sollte die mit einen Wasserteleskop beobachtete Aberration vier Drittel ihres wahren Werts betragen[2].

Gemäß der Wellentheorie nach Fresnel wird der Äther erstens als ruhend angenommen, außer er befindet sich im Innern von durchsichtigen Medien, und zweitens wird angenommen dass der sich darin befindliche Äther mit einer geringeren Geschwindigkeit als das Medium bewegt ist, und zwar im Verhältnis $\frac{n^2-1}{n^2}$, wo n der Brechungsindex ist. Diese beiden Hypothesen liefern eine vollständige und befriedigende Erklärung der Aberration. Die zweite Hypothese, ungeachtet ihrer scheinbaren Unwahrscheinlichkeit, muss als vollständig bewiesen gelten, und zwar erstens durch das berühmte Experiment von Fizeau[3], und zweitens durch die klare Bestätigung unserer eigenen Arbeit[4]. Die experimentelle Prüfung der ersten Hypothese bildet den Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Wenn die Erde ein transparenter Körper wäre, dann würde mit Rücksicht auf die eben zitierten Experimente vielleicht eingeräumt werden, dass der intermolekulare Äther im Raum ruhen würde, ungeachtet der Erdbewegung in ihrem

[1] Diese Forschungsarbeit wurde mit Hilfe des Bache Fund durchgeführt.

[2] Es mag angefügt werden, dass die meisten Autoren die Hinlänglichkeit der Erklärung gemäß der Emissionstheorie zugeben; obwohl die Schwierigkeit tatsächlich sogar größer ist als nach der Wellentheorie. Denn gemäß der Emissionstheorie muss die Lichtgeschwindigkeit im Wasserteleskop größer sein, und folglich sollte der Aberrationswinkel kleiner sein; deshalb (um ihn auf seinen wahren Wert zurückzuführen) müssen wir die absurde Hypothese aufstellen dass die Bewegung des Wassers im Teleskop den Lichtstrahl in entgegengesetzte Richtungen trägt!

[3] Comptes Rendus, xxxiii, 349, 1851; Pogg. Ann. Ergänzungsband, iii. 457, 1853; Ann. Chim. Phys., III, lvii, 385, 1859.

[4] Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light. Dieses Journal, III, xxxi, 377, 1886.

Orbit; jedoch haben wir kein Recht, die Folgerung aus diesen Experimenten auf opake Körper zu erweitern. Aber es kann kaum in Frage gestellt werden, dass der Äther durch Metalle hindurchgehen kann bzw. es tatsächlich tut. Lorentz verweist auf die Illustration einer metallenen Barometerröhre. Wenn die Röhre geneigt ist, dann wird der Äther im Bereich oberhalb des Bleis sicherlich aufgrund von Inkompressibilität hinaus gedrängt[5]. Abermals haben wir jedoch kein Recht anzunehmen, dass diese Entweichung völlig ungehindert geschieht, und wenn ein Widerstand vorhanden ist, wie klein auch immer, dann können wir sicherlich nicht annehmen, dass ein opaker Körper wie die Erde eine freie Durchquerung ihrer ganzen Masse zulässt. Doch wie Lorentz treffend bemerkt: "Auf jeden Fall werden wir meiner Meinung nach in einer solch wichtigen Frage gut daran tun, uns nicht durch Überlegungen über die Wahrscheinlichkeit oder Einfachheit der einen oder der anderen Hypothese leiten zu lassen, sondern wir sollten uns auf die Experimente beziehen, um den Bewegungszustand (Ruhe oder Bewegung) zu erfahren, den der Äther an der Erdoberfläche besitzt."[6]

Im April 1881 wurde eine Methode vorgeschlagen und durchgeführt, um die Frage experimentell zu prüfen.[7]

Während der Ableitung der Formel für die zu messende Größe wurde die Auswirkung übersehen, welche die Bewegung der Erde durch den Äther auf den im rechten Winkel zu dieser Bewegung liegenden Lichtweg hat.[8] Die Besprechung dieses Versehens und des gesamten Experiments bildet den Gegenstand einer tief schürfenden Analyse durch H. A. Lorentz,[9] welcher fand dass dieser Effekt keinesfalls vernachlässigt werden darf. Folglich betrug die zu messende Größe tatsächlich nur die Hälfte des angenommenen Werts, und da dies bereits knapp über der Fehlergrenze des Experiments war, könnte die Folgerung aus dem Experiment sehr wohl in Frage gestellt werden; da jedoch der Hauptteil der Theorie unbezweifelt bleibt, wurde entschieden das Experiment zu wiederholen, und zwar mit solchen Modifikationen die sicherstellen würden, dass das theoretische Resultat viel zu groß ist, als dass es von Experimentalfehlern überdeckt werden könnte. Die Theorie der Methode kann wie folgt kurz angegeben werden:

Es sei sa, Fig. 1, ein Lichtstrahl der teilweise in ab reflektiert, und in ac teilweise übertragen wird, und er wird zurückgesendet durch die Spiegel b und c entlang ba und ca. ba wird teilweise entlang ad übertragen,

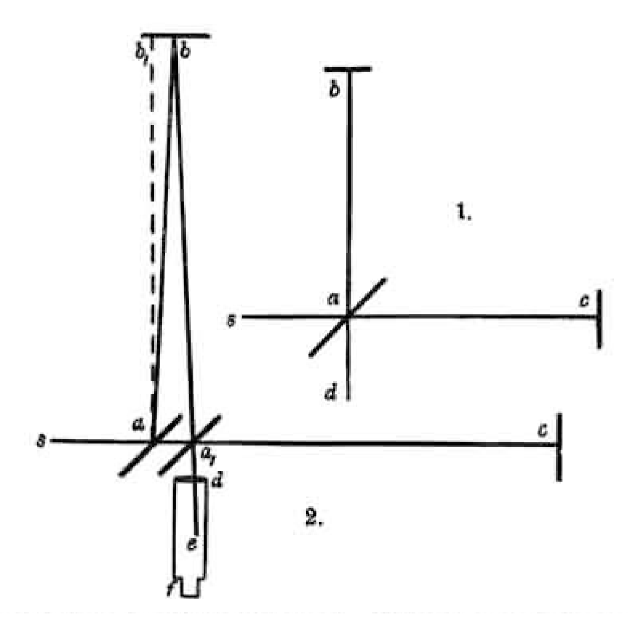
[5] Es mag eingewendet werden, dass er durch den Raum zwischen dem Blei und den Wänden entweichen kann; aber dies könnte durch Amalgamierung der Wände verhindert werden.

[6] Archives Néerlandaises, xxi, 2me livr.

[7] The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether, von Albert A. Michelson, dieses Jour., III xxii, 120.

[8] Es sei erwähnt, dass er Autor der vorherigen Arbeit durch M. A. Potier aus Paris (im Winer 1881) auf den Fehler hingewiesen wurde.

[9] De l'Influence du Mouvement de la Terre sur les Phen. Lum. Archives Néerlandaises, xxi, 2me livr., 1886.



und ca wird teilweise reflektiert entlang ad. Wenn die Wege ab und ac gleich sind, dann werden die beiden Strahlen entlang ad interferieren. Es werde nun angenommen, dass der Äther sich in Ruhe befindet, und der gesamte Apparat sich in Richtung sc mit der Geschwindigkeit der Erde in ihrem Orbit bewegt, dann werden die vom Strahl durchquerten Richtungen und Abstände folgendermaßen verändert: – Der Strahl sa wird entlang ab reflektiert, Fig. 2; der Winkel $bab_{/}$ (der gleich mit der Aberration $= a$ ist) wird zurückgesendet entlang $ba_{/}$, $(aba_{/} = 2a)$, und geht zum Fokus des Teleskops, dessen Richtung unverändert ist. Der übertragene Strahl geht entlang ac, wird zurückgesendet entlang $ca_{/}$, und wird reflektiert bei $a_{/}$, wodurch $ca_{/}e$ gleich $90 - a$ wird, und deswegen fällt er weiterhin mit dem ersten Strahl zusammen. Es sei angemerkt, dass die Strahlen $ba_{/}$ und $ca_{/}$ sich nicht genau am selben Punkt $a_{/}$ treffen, doch der Unterschied ist von zweiter Ordnung; dies beeinträchtigt nicht die Gültigkeit der Überlegung. Es ist nun nötig, die Differenz der beiden Wege $aba_{/}$ und $aca_{/}$ zu finden.

Es sei

$V =$ die Lichtgeschwindigkeit

$D =$ der Abstand ab oder ac, Fig. 1.

$T =$ die Zeit welche das Licht benötigt um von a nach c zu gelangen.

$T_{/} =$ die Zeit welche das Licht benötigt um von c nach $a_{/}$ zurückzukehren, (Fig. 2.)

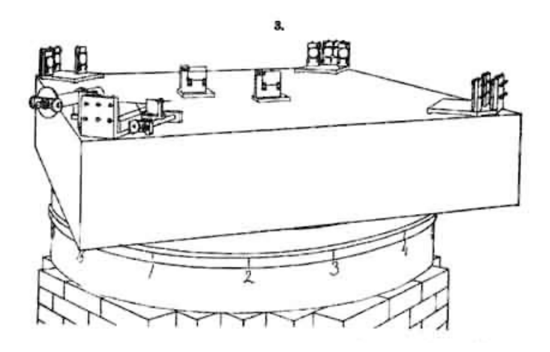
Dann ist $T = \frac{D}{V-v}$, $T_{/} = \frac{D}{V+v}$. Die gesamte Zeit für den Hin- und Rückweg ist $T + T_{/} = 2D\frac{V}{V^2-v^2}$, und die Distanz die in dieser Zeit zurückgelegt wurde ist $2D\frac{V^2}{V^2-v^2} = 2D\left(1 + \frac{v^2}{V^2}\right)$, unter Vernachlässigung von Größen vierter Ordnung. Die Differenz ist deshalb $D\frac{v^2}{V^2}$. Wenn nun der gesamte Apparat um

90° gedreht wird, dann wird die Differenz in entgegengesetzter Richtung sein, folglich sollte die Verschiebung der Interferenzstreifen $2D\frac{v^2}{V^2}$ sein. Wenn nur die Orbitalgeschwindigkeit der Erde berücksichtigt werden würde, dann würde sich $2D \times 10^{-8}$ ergeben. Wenn, wie es im ersten Experiment der Fall war, $D = 2 \times 10^6$ Wellen von gelbem Licht gegeben wären, dann würde die erwartete Verschiebung 0.04 der Distanz zwischen den Interferenzstreifen betragen.

Eine der Hauptschwierigkeiten die im ersten Experiment auftraten, war den Apparat zu drehen ohne eine Verzerrung zu produzieren; eine andere Schwierigkeit war seine extreme Empfindlichkeit Vibrationen gegenüber. Diese war so groß, dass es (mit Ausnahme von kurzen Intervallen) unmöglich war die Interferenzstreifen zu sehen als in der Stadt gearbeitet wurde, sogar um zwei Uhr am Morgen. Schließlich (wie zuvor bemerkt) war die zu beobachtende Größe, nämlich eine Verschiebung von etwas weniger als ein Zwanzigstel der Distanz zwischen den Interferenzstreifen, zu klein um entdeckt zu werden wenn sie durch Experimentalfehler überdeckt worden wäre.

Die erstgenannte Schwierigkeit wurde vollständig überwunden durch die Anbringung des Apparats auf einem massiven auf Blei schwimmenden Stein; und die zweite wurde überwunden durch Vergrößerung (durch wiederholte Reflektion) des Lichtweges auf ca. das Zehnfache ihres vorhergehenden Werts.

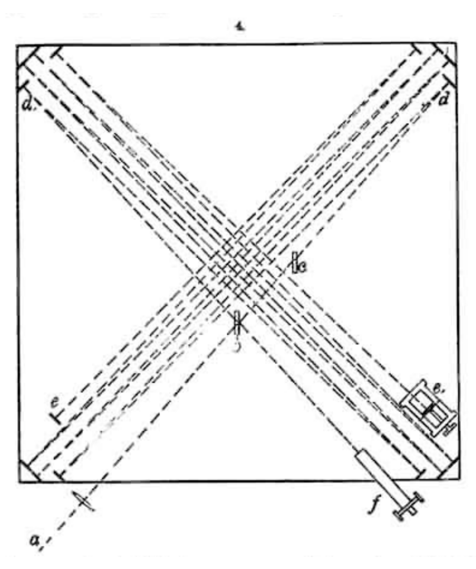
Der Apparat ist perspektivisch dargestellt in Fig. 3, im Grundriss in Fig. 4, und im Vertikalschnitt in Fig. 6. Der Stein *a* (Fig. 5) ist ca. 1.5 m Meter groß und 0.3 Meter dick. Er ruht auf einer ringförmigen hölzernen Plattform *bb* von 1.5 Meter Außendurchmesser, 0.7 Meter Innendurchmesser, und 0.25 Meter Dicke. Die Plattform ruht auf Blei, das sich in einer Gusseisentruhe *cc* von 1.6 Zentimeter Dicke befindet, und welches solche Dimensionen besitzt um einen Zwischenraum von ca. einem Zentimeter um die Plattform zu lassen. Ein Stift *d* wird durch die Arme *gggg* geführt, und passt in einen an der Plattform angebrachten Sockel. Der Stift kann durch einen bei *f* gedrehten Hebel in den Sockel hineingedrückt oder herausgezogen werden. Dieser Stift hält die Plattform konzentrisch mit der Truhe, trägt jedoch keinen Teil des Gewichts des Steines. Die ringförmige Eisentruhe ruht auf einem Zementbett auf einem niedrigen Ziegelpfeiler, der gebaut ist in der Form eines hohlen Oktagons.



An jedem Ende des Steins wurden vier Spiegel *dd ee*, Fig. 4., platziert. In der Nähe der Steinzentrums befand sich ein plan-paralleles Glas *b*. Diese waren

so angeordnet, dass das von einem Argandbrenner a ausgehende Licht, während es eine Linse durchquert, auf b fällt sodass es teilweise zu d reflektiert wird; die beiden Lichtbündel folgten den in der Figur angezeigten Wegen, $bdedbf$ und $bd_/e_/d_/bf$, und wurden durch das Teleskop f beobachtet. Sowohl f als auch a rotierten mit dem Stein. Die Spiegel bestanden aus sorgfältig zu optischen Planflächen gearbeitetem Spiegelmetall von fünf Zentimetern Durchmesser, und die Gläser b und e waren planparallel und von der selben Dicke von 1.25 Zentimeter; ihre Oberflächen maßen 5.0 mal 7.5 Zentimeter. Der zweite von ihnen war im Weg eines der Lichtbündel platziert, um die Durchquerung des anderen durch die selbe Dicke des Glases zu kompensieren. Die Gesamtheit des optischen Teiles des Apparats wurde mit einer hölzernen Hülle bedeckt gehalten, um Luftströme und rapide Temperaturänderungen zu vermeiden.

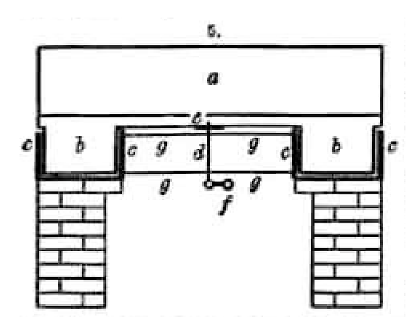
Die Justierung erfolgte auf folgende Weise: Die Spiegel wurden mit Schrauben in die Gussteile justiert, welche



die vier Spiegel fest hielten, und gegen welche sie mit Federn gedrückt wurden, bis das Licht beider Lichtbündel im Teleskop sichtbar wurde; die Längen der beiden Wege wurden mit einem leichten hölzernen Stab gemessen der diagonal von Spiegel zu Spiegel reichte, wobei die Distanz von einer kleinen Stahlskala auf Zehntel Millimeter genau abgelesen wurde. Die Differenz in den beiden Weglängen wurde dann annuliert durch Spiegel $e_/$. Dieser Spiegel hatte drei Justierungen; er hatte eine Justierung in der Höhe und eine im Azimuth, wie alle anderen Spiegel - jedoch feiner; er hatte auch eine Justierung in der Richtung des einfallenden Strahls, welche vorwärts oder rückwärts gleitet, jedoch sehr genau parallel blieb relativ zur vorhergehenden Ebene. Die drei Justierungen dieser Spiegel konnten mit der in Stellung befindlichen hölzernen Hülle vorgenommen werden.

Die Wege sind nun annähernd gleich, die beiden Bilder der Lichtquelle oder von irgendeinem wohl-definierten Objekt (welches vor der Kondensorlinse plat-

ziert war) wurden dazu gebracht ineinander zu fallen, das Teleskop war nun für die deutliche Sicht der erwarteten Interferenzbänder justiert, und Sodiumlicht wurde anstatt weißem Licht eingesetzt als die Interferenzbänder erschienen. Diese wurden nun so klar wie möglich gemacht durch Justierung von Spiegel $e_/$, danach wurde das weiße Licht wiederhergestellt, und die Schraube welche die Weglänge verändert, wurde sehr langsam bewegt (eine Schraubendrehung von einhundert Fäden pro Zoll verändert den Weg um annähernd 1000 Wellenlängen) bis die farbigen Interferenzstreifen wieder in weißem Licht erschienen. Diesen wurde nun eine passende Breite und Position gegeben, und der Apparat war bereit für die Beobachtung.



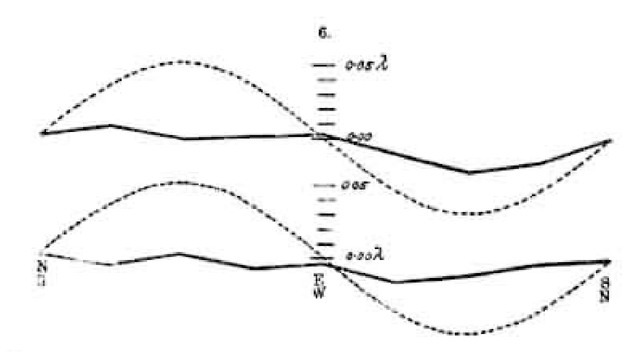
Die Beobachtungen wurden wie folgt durchgeführt: Um die Gusseisentruhe herum waren sechzehn Markierungen von gleichem Abstand vorhanden. Der Apparat wurde sehr langsam rotiert (eine Drehung in sechs Minuten) und nach wenigen Minuten wurde das Fadenkreuz des Mikrometers auf die klarste der Interferenzstreifen gesetzt, und zwar zum Zeitpunkt der Passage an einer der Markierungen. Die Bewegung war so langsam, dass dies leicht und genau durchgeführt werden konnte. Die Anzeige des Schraubenkopfs auf dem Mikrometer wurde notiert, und ein sehr leichter und gradueller Impuls wurde gegeben, um die Bewegung des Steins aufrecht zu erhalten; während der Passage der zweiten Markierung wurde der gesamte Prozess wiederholt, und dies wurde fortgesetzt bis der Apparat sechs Umdrehungen vollendet hatte. Wenn der Apparat in langsam gleichförmiger Bewegung gehalten wurde, ergab sich, dass die Resultate weit einheitlicher und konsistenter waren als wenn der Stein für jede Beobachtung zur Ruhe gebracht worden wäre; denn die Auswirkungen der Belastungen waren für mindestens eine halbe Minute, nachdem der Stein zur Ruhe kam, zu bemerken, und während dieser Zeit kamen die Auswirkungen von Temperaturänderungen ins Spiel.

Die folgenden Tabellen zeigen die Bedeutung der sechs Anzeigen; die erste für ca. am Mittag gemachte Beobachtungen, die zweite für ca. 6 Uhr am Abend. Die Anzeigen entsprechen den Begrenzungen der Schraubenköpfe. Die Breite der Streifen variiert von 40 bis zu 60 Begrenzungen, der Durchschnittswert ist ca. 50, sodass eine Begrenzung 0.02 Wellenlängen bedeutet. Die Rotation in den Beobachtungen am Mittag war den Zeigerbewegungen einer Uhr entgegengesetzt, und gleichgesetzt in den abendlichen Beobachtungen.

Mittags-Beobachtungen									
	16.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
8. Juli	44.7	44.0	43.5	39.7	35.2	34.7	34.3	32.5	28.2
9. Juli	57.4	57.3	58.2	59.2	58.7	60.2	60.8	62.0	61.5
11. Juli	27.3	23.5	22.0	19.3	19.2	19.3	18.7	18.8	16.2
Mittel	43.1	41.6	41.2	39.4	37.7	38.1	37.9	37.8	35.3
Mittel in w. l.	.862	.832	.824	.788	.754	.762	.758	.756	.706
	.706	.692	.686	.688	.688	.678	.672	.628	.616
End-Mittel	.784	.762	.755	.738	.721	.720	.715	.692	.661
		9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16
8. Juli		26.2	23.8	23.2	20.3	18.7	17.5	16.8	13.7
9. Juli		63.3	65.8	67.3	69.7	70.7	73.0	70.2	72.2
11. Juli		14.3	13.3	12.8	13.3	12.3	10.2	7.3	6.5
Mittel		34.6	34.3	34.4	34.4	33.9	33.6	31.4	
Mittel in w. l.		.692	.686	.688	.688	.678	.672	.628	
End-Mittel									

Abend-Beobachtungen									
	16.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
8. Juli	61.2	63.3	63.3	68.2	67.7	69.3	70.3	69.8	69.0
9. Juli	26.0	26.0	28.2	29.2	31.5	32.0	31.3	31.7	33.0
12. Juli	66.8	66.5	66.0	64.3	62.2	61.0	61.3	59.7	58.2
Mittel	51.3	51.9	52.5	53.9	53.8	54.1	54.3	53.7	53.4
Mittel in w. l.	1.026	1.038	1.050	1.078	1.076	1.082	1.086	1.074	1.068
	1.068	1.086	1.076	1.084	1.100	1.136	1.144	1.154	1.172
End-Mittel	1.047	1.062	1.063	1.081	1.088	1.109	1.115	1.114	1.120
		9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16
8. Juli		71.3	71.3	70.5	71.2	71.2	70.5	72.5	75.5
9. Juli		35.8	36.5	37.3	38.8	41.0	42.7	43.7	44.0
12. Juli		55.7	53.7	54.7	55.0	58.2	58.5	57.0	56.0
Mittel		54.3	53.8	54.2	55.0	56.8	57.2	57.7	58.6
Mittel in w. l.		1.086	1.076	1.084	1.100	1.136	1.144	1.154	1.172
End-Mittel									

Die Resultate der Beobachtungen wurden graphisch in Fig. 6 ausgedrückt. Der obere Teil ist die Kurve der Beobachtungen zu Mittag, und der untere Teil ist diejenige für die Abendbeobachtungen. Die gepunkteten Kurven stellen *ein Achtel* der theoretischen Verschiebungen dar. Der Schluss aus der Figur scheint berechtigt, dass wenn irgendeine Verschiebung vorhanden ist,



die durch die relative Bewegung der Erde und des Lichtäthers verursacht wird, dann kann diese nicht größer sein als 0.01 der Distanz zwischen den Streifen.

Unter ausschließlicher Berücksichtigung der Erdbewegung während des Orbit, sollte die Verschiebung $2D\frac{v^2}{V^2} = 2D \times 10^{-8}$ betragen. Die Entfernung D war ca. elf Meter, oder 2×10^7 Wellenlängen von gelbem Licht; folglich betrug die erwartete Verschiebung 0.4 Streifen. Die tatsächliche Verschiebung war sicherlich geringer als ein Zwanzigstel dieses Werts, und möglicherweise weniger als ein Vierzigstel. Aber da die Verschiebung proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist, so ist die Relativgeschwindigkeit der Erde und des Äthers möglicherweise weniger als ein Sechstel der Orbitalgeschwindigkeit der Erde, und sicherlich weniger als ein Viertel.

In dem Vorausgehenden wurde lediglich die Orbitalbewegung der Erde betrachtet. Wird diese nun kombiniert mit der des Sonnensystems, über die allerdings wenig mit Sicherheit bekannt ist, müsste das Resultat modifiziert werden; und es ist wohl möglich dass die resultierende Geschwindigkeit zum Zeitpunkt der Beobachtungen klein war, obwohl die Chancen sehr dagegen sprechen. Das Experiment wird deswegen in Intervallen von drei Monaten wiederholt, und somit wird jede Unsicherheit vermieden.

Es erscheint, basierend auf all dem Vorhergehenden, hinreichend sicher zu sein, dass wenn eine Relativbewegung zwischen Erde und Lichtäther existiert, dann muss diese sehr klein sein; jedoch durchaus klein genug um Fresnel's Erklärung der Aberration zu widerlegen. Stokes präsentierte eine Theorie der Aberration, welche annimmt dass der Äther an der Erdoberfläche relativ zur letzteren in Ruhe ist, und dies erfordert lediglich den Zusatz, dass die Relativgeschwindigkeit ein Potential besitzt; doch Lorentz zeigte dass diese Bedingungen unverträglich sind. Lorentz schlug dann eine Modifikation vor, welche einige Vorstellungen von Stokes und Fresnel kombiniert, und nimmt die Existenz eines Potentials zusammen mit dem Fresnelschen Koeffizienten an. Wenn es nun berechtigt wäre aus der vorliegenden Arbeit zu schließen, dass die Erde in Ruhe ist relativ zur Erdoberfläche, dann könnte gemäß Lorentz kein Geschwindigkeitspotential existieren, und seine eigene Theorie scheitert ebenso.

Zusatz.

Aus dem Vorhergehenden ergibt sich offensichtlich, dass es aussichtslos wäre zu versuchen, das Problem der Bewegung des Sonnensystems durch Beobachtungen der optischen Phänomene auf der Oberfläche der Erde zu lösen. Aber es ist nicht unmöglich, dass bei selbst bescheidenen Abständen über dem Meeresspiegel, beispielsweise auf einer isolierten Bergspitze, die Relativbewegung wahrnehmbar sein könnte mit einem Apparat, welcher in diesen Experimenten benutzt wurde. Vielleicht sollte, wenn das Experiment jemals unter diesen Umständen unternommen werden sollte, die Hülle aus Glas sein oder entfernt werden.

Es könnte sich lohnen, auf eine andere Methode für die Vervielfachung der Quadrats der Aberration hinzuweisen, die sich selbst während der Vorbereitung des Experiments aufdrängte, und welche ausreicht um sie in den Bereich der Beobachtbarkeit zu bringen. Diese beruht auf der Tatsache, dass die Reflektion von einer beweglichen Oberfläche sich von den gewöhnlichen Reflektionsgesetzen unterscheidet.

Es sei ab (Fig. 1) eine ebene Welle, welche auf den Spiegel mn mit einem Einfallwinkel von 45° fällt. Wenn der Spiegel in Ruhe ist, dann wird die Wellenfront nach der Reflektion ac sein.

Nun nehme man an, dass der Spiegel sich in eine Richtung bewegt welche einen Winkel mit seiner Normalen bildet, und zwar mit der Geschwindigkeit ω. Es sei V die Lichtgeschwindigkeit im als ruhend angenommenen Äther, und cd sei die Abstandsvergrößerung die das Licht zurückzulegen hat um d zu erreichen. In dieser Zeit wird der Spiegel die Distanz $\frac{cd}{\sqrt{2} cos \alpha}$ zurückgelegt haben. Wir haben $\frac{cd}{ad} = \frac{\omega\sqrt{2}\cos\alpha}{V}$ welches $= r$ gesetzt wird, und $\frac{ac}{ad} = 1 - r$.

Um die neue Wellenfront zu finden, zeichne man den Bogen fg mit b als Zentrum und ad als Radius; die Tangente zu diesem Bogen aus d wird die neue Wellenfront sein, und die Normale zu dieser Tangente aus b wird die neue Richtung sein. Diese wird sich von der Richtung ba unterscheiden durch den Winkel θ, den zu finden erforderlich ist. Aus der Gleichheit der Dreiecke adb und edb folgt, dass $\theta = 2\varphi,\ ab = ac$,

$$\tan adb = \tan\left(45^o - \frac{\theta}{2}\right) = \frac{1-\tan\frac{\theta}{2}}{1+\tan\frac{\theta}{2}} = \frac{ac}{ad} = 1 - r,$$

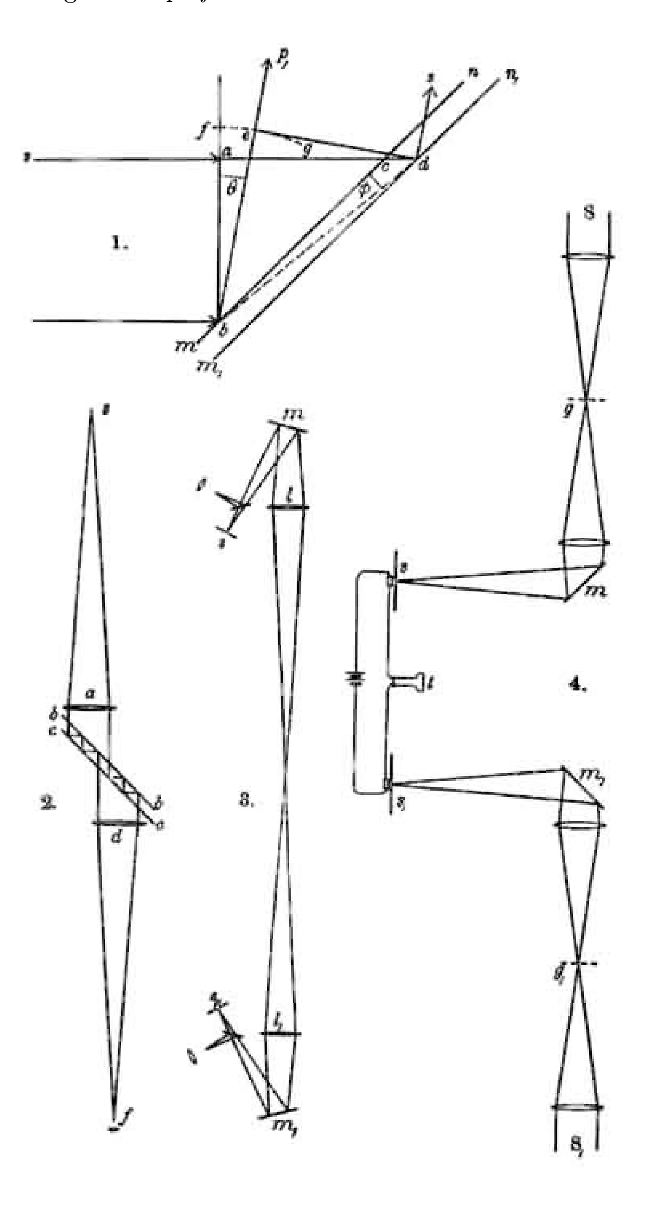
oder wenn man Ausdrücke von der Ordnung r^2 vernachlässigt:

$$\theta = r + \frac{r^2}{2} = \frac{\sqrt{2}\omega\cos\alpha}{V} + \frac{\omega^2}{V^2}\cos^2\alpha$$

Nun falle das Licht auf einen parallelen Spiegel der dem ersten zugewandt ist, dann sollten wir haben $\theta_/ = \frac{-\sqrt{2}\omega\cos\alpha}{V} + \frac{\omega^2}{V^2} cos^2\alpha$ und die vollständige Abweichung würde $\theta + \theta_/ = 2\rho^2\cos^2\alpha$ sein, wo ρ der Aberrationswinkel ist, solange nur die Orbitalbewegung der Erde berücksichtigt wird. Die maximale Verschiebung durch Drehung des gesamten Apparats um 90°, würde $\Delta = 2\rho^2 = 2 = 0.004''$ sein. Mit fünfzig solcher Paare würde die Verschiebung $0.2''$ sein. Doch astronomische Beobachtungen bei Umständen welche sehr viel weniger

günstig sind als jene, unter welchen diese unternommen werden sollten, wurden im Bereich von Hundertstel einer Sekunde gemacht; so dass diese neue Methode es wahrscheinlich erscheinen lässt, dass sie mindestens ebenso empfindlich ist als die Vorhergehenden.

Die Anordnung des Apparats könnte so sein wie in Fig. 2; s ist ein im Fokus der Linse a befindlicher Schlitz; bb cc sind zwei Glasspiegel die optisch eben und auf eine Weise versilbert sind, dass sie ca. ein Zwanzigstel des Lichte hindurchzulassen erlauben, und ca. neunzig Prozent reflektieren. Die Intensität des auf das Beobachtungsteleskop df fallenden Lichtes



würde ca. ein Millionstel der ursprünglichen Intensität betragen, so dass, wenn Sonnenlicht oder eine elektrische Lampe benutzt worden wären, es immer noch klar gesehen werden könnte. Die Spiegel $bb_/$ und $cc_/$ würden ausreichend von der Parallelität abweichen, um die nachfolgenden Bilder zu teilen. Schließlich muss der Apparat nicht auf eine Weise befestigt werden um rotieren zu können, da die Erdrotation ausreichend wäre.

Wenn es möglich wäre, die Lichtgeschwindigkeit mit ausreichender Genauigkeit zu messen, ohne den Strahl zu seiner Ausgangsposition zurücksenden zu müssen, dann würden die Probleme der Messung der ersten Potenz der Relativgeschwindigkeit zwischen Erde und Äther gelöst sein. Das mag nicht so aussichtslos sein als es auf den ersten Blick erscheinen könnte, da die Schwierigkeiten allesamt mechanischer Art sind und möglicherweise im Laufe der Zeit überwunden werden können.

Zum Beispiel stelle man sich vor (Fig. 3), dass m und $m_/$ zwei Spiegel sind die sich mit gleicher Geschwindigkeit in gegensätzliche Richtungen drehen. Es ist offensichtlich, dass das aus s kommende Licht ein stationäres Bild bei $s_/$ bilden wird, und analog dazu wird aus $s_/$ kommendes Licht ein stationäres Bild bei s bilden. Wenn nun die Geschwindigkeit des Spiegels ausreichend erhöht wird, wobei ihre Phasen weiterhin exakt gleich bleiben, dann werden beide Bilder bei s und $s_/$ reflektiert, und zwar umgekehrt proportional zu den Geschwindigkeiten des Lichtes in den beiden Richtungen; oder, wenn die beiden Ablenkungen gleich gemacht werden, und die Phasendifferenz der Spiegel gleichzeitig gemessen wurde, dann wird es schließlich proportional zu der Differenz der Geschwindigkeit in den beiden Richtungen. Die einzig wirkliche Schwierigkeit liegt in dieser Messung. Das folgende ist vielleicht eine mögliche Lösung: $gg_/$ (Fig. 4) sind zwei Gitter auf denen Sonnenlicht konzentriert wird. Diese sind so ausgerichtet, nachdem sie auf die rotierenden Spiegel m und $m_/$ gefallen sind, dass bei s und $s_/$ (zwei sehr empfindliche Selenzellen die mit einer Batterie und einem Telefon zusammen geschaltet sind) Bilder der Gitter durch das Licht geformt werden. Wenn alles symmetrisch ist wird der Klang des Telefons ein Maximum bilden. Wenn nun einer der Schlitze s durch die halbe Distanz zwischen dem Bild und den Gitterstäben verschoben wird, dann wird Stille herrschen. Nun nehme man an dass die beiden Ablenkungen genau gleich gemacht wurden, d.h. der Schlitz ist auf Stille justiert. Wenn dann das Experiment wiederholt wird, die Erdrotation den gesamten Apparat über 180° gedreht hat, und die Ablenkungen wieder gleich gemacht wurden, dann wird nicht mehr länger Stille herrschen, und der Winkelabstand durch welchen s bewegt werden muss um die Stille wiederherzustellen, wird die benötigte Phasendifferenz betragen.

Es verbleiben drei andere Methoden, alle astronomischer Art, um das Problem der Bewegung des Sonnensystems durch den Raum in Angriff zu nehmen.

1. Das Beobachtung der Eigenbewegung der Sterne mit Hilfe eines Teleskops. Dies gab uns eine hoch wahrscheinliche Bestimmung der Richtung dieser Bewegung, jedoch nur eine Vermutung bezüglich ihres Betrages.

2. Die spektroskopische Beobachtung der Sternbewegung in der Sichtlinie. Dies könnte Daten zur Verfügung stellen bezüglich der Relativbewegung alleine, doch es erscheint wahrscheinlich, dass die daraus gewonnene Information weit

zutreffender sein wird als jede andere, aufgrund der immensen Verbesserung in der Photographie stellarer Spektra.

3. Schließlich verbleibt die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit durch Beobachtungen der Verfinsterung von Jupiters Satelliten. Wenn es die verbesserten photometrischen Methoden, die im Harvard Observatorium praktiziert werden, möglich machen diese mit ausreichender Genauigkeit zu beobachten, dann wird der Unterschied in den für die Lichtgeschwindigkeit gefundenen Resultaten, wenn Jupiter am Nächsten und am Fernsten von der Sichtlinie ist, nicht nur die Bewegung des Sonnensystems relativ zu den Sternen, sondern relativ zum Lichtäther selbst liefern.

Siehe auch

http://de.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley-Experiment